

Efeito dos molhes do Douro em diferentes cenários de cheia na cidade do Porto, Portugal

Raquel Peixoto¹, Isabel Iglesias², Paulo Avilez-Valente^{1,2}

ec11331@fe.up.pt; isabel.iglesias.fdz@gmail.com; pvalente@fe.up.pt

¹*Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Rua Dr. Roberto Frias s/n, 4200-465 Porto, Portugal*

²*Centro Interdisciplinar de Investigação Marinha e Ambiental, Universidade do Porto, Terminal de Cruzeiros do Porto de Leixões. Avenida General Norton de Matos, s/n, 4450-208 Matosinhos, Portugal*

RESUMO

O rio Douro é um dos rios mais importantes da Península Ibérica. Desagua no Oceano Atlântico num estuário urbano de 21.6 km de comprimento e apresenta uma restinga de areia na sua embocadura. Esta restinga foi sofrendo alterações, a nível de forma e de posição devido a fenómenos naturais e actividades antrópicas. Em 2009, foi concluída a construção dos dois molhes de protecção da barra do Douro. Esta obra provocou alterações morfodinâmicas significativas, provocando o recuo da restinga para o interior do estuário e um aumento da sua robustez.

O objectivo deste trabalho consiste na análise do efeito da construção dos molhes na hidrodinâmica do estuário do Douro. O estudo é realizado recorrendo à simulação numérica de vários cenários de cheia. Observou-se que, para alguns dos cenários de cheia simulados, a geometria dos molhes, associada ao aumento da área superficial da restinga, constitui um obstáculo ao escoamento fluvial. Por outro lado, o aumento da robustez da restinga dificulta o seu galgamento e/ou rebentamento. Consequentemente, a elevação da superfície livre a montante da restinga é maior após a construção dos molhes, aumentando o risco de inundação das margens em caso de cheia.

Palavras-Chave: modelação numérica, cheias, estuário do Douro, restinga, molhes.

1. Introdução

Os estuários são corpos aquáticos costeiros em que ocorre a transição entre as massas de água dos rios e a do mar. São zonas extremamente dinâmicas, com grandes variações a nível de salinidade, correntes, estratificação, qualidade da água, etc., estando sujeitos à influência de fenómenos meteo-oceanográficos e geomorfológicos, como o vento, a maré, as ondas, as correntes, os caudais fluviais, a batimetria e a configuração das margens.

São áreas altamente produtivas em termos de ecossistemas, apresentando grandes concentrações de nutrientes e servindo como habitat a uma numerosa quantidade de espécies. Costumam ser áreas fortemente urbanizadas devido à sua situação privilegiada em termos de aportes pesqueiros, protecção de embarcações, transporte flúvio-marítimo, entre outras.

A ocupação massiva das margens dos estuários afecta a sua estabilidade física e ambiental. Acções antrópicas como a extracção de inertes ou a construção de barragens e quebramares podem alterar

os padrões principais de circulação produzindo por sua vez alterações nas áreas de erosão e acreção e, portanto, alterações na configuração do estuário. Estas áreas tornam-se, assim, vulneráveis à acção dos fenómenos meteo-oceanográficos, colocando em risco a população e o seu património, e afectando a economia da região. De entre estes fenómenos, as cheias são o que mais danos provoca nas margens estuarinas.

Os molhes da embocadura do Douro foram construídos com o objectivo de garantir a segurança da navegação na barra do rio e de proteger as margens do estuário do efeito da agitação marítima. Esperava-se, simultaneamente, que permitissem a fixação da geometria da restinga, evitando que esta invadisse o canal de navegação. Por outro lado, não deveriam constituir um obstáculo ao escoamento fluvial, não aumentando o risco de cheia nas margens do estuário. O objectivo deste estudo consiste na análise da hidrodinâmica do estuário do Douro e na simulação, por meio de modelos numéricos, de vários cenários de cheia, antes e após a construção dos molhes.

2. Área de estudo

O rio Douro é um dos rios mais importantes da Península Ibérica. Nasce na Serra de Urbión, em Espanha e tem a sua foz no Atlântico entre as cidades do Porto e Vila Nova de Gaia. O seu

estuário (cf. Figura 1) localiza-se numa região temperada. A temperatura da água na zona estuarina varia entre os 7 °C no Inverno e os 22 °C no Verão (Magalhães *et al.*, 2002).

As marés na costa portuguesa apresentam um carácter semidiurno. O estuário do Douro pode ser classificado como mesotidal, com uma amplitude de maré dos 2 aos 4 m (Vieira e Bordalo, 2000).

O estuário está limitado a montante pela barragem de Crestuma-Lever, o que reduz a extensão do estuário a 21.6 km. A barragem fez com que o caudal do rio deixasse de ser contínuo, passando a depender não só da precipitação na bacia hidrográfica, mas também das necessidades de produção de energia hidroeléctrica. O caudal descarregado pode passar, em poucos minutos, de 0 m³/s para mais de 1000 m³/s (Azevedo *et al.*, 2008), para além de se verificarem variações no caudal anual médio (Dias, *sem data*), o que afecta as características do estuário, desde a qualidade da água até à estratificação.

O estuário do Douro é considerado um estuário de cunha salina para baixos caudais descarregados, verificando-se estratificação para caudais inferiores a 300 m³/s (Azevedo *et al.*, 2008), com um prisma de maré de 25×10⁶ m³ para a maré viva e de 10×10⁶ m³ para a maré morta (Portela, 2008). Para descargas acima de 690 m³/s, o estuário é constituído apenas por água doce,

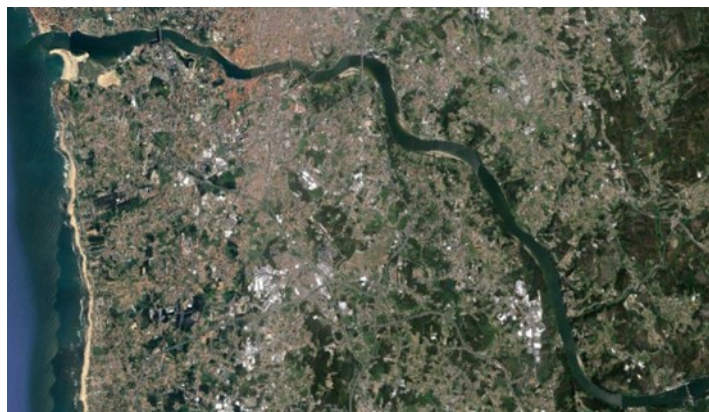


Fig. 1. Estuário do Douro

mesmo na preia-mar da maré viva. O tempo de residência varia consoante os caudais fluviais descarregados, podendo ser de 8 h a mais de 2 semanas (Vieira e Bordalo, 2000).

A jusante, o estuário do Douro apresenta uma barra de areia constituída por sedimentos da bacia hidrográfica do Douro e por areias arrastadas na deriva litoral (Santos *et al.*, 2010). Esta barra de areia, ou restinga, é conhecida localmente como o Cabedelo, está enraizada na margem sul do estuário, é perpendicular à margem do estuário e apresenta um comprimento médio de 800 m e uma largura média de 300 m. A restinga apresenta um dinamismo muito elevado face a determinados parâmetros como a velocidade e direcção do vento, os caudais fluviais, a agitação marítima e a amplitude da maré, entre outros (Santos *et al.*, 2010; Bastos *et al.*, 2012). Além dos fenómenos naturais, as acções antrópicas, como a construção de estruturas de defesa costeira (quebramares), barragens, extracção de inertes e dragagens também têm influência nos processos de erosão/acrecção da restinga, devido às alterações na quantidade e tipo de sedimentos e no fluxo do rio ou a modificações nos padrões das correntes (Granja *et al.*, 2011). A batimetria, que tem sofrido alterações nos últimos anos, também afecta o seu processo de formação, pois é em águas pouco profundas que estes corpos arenosos se desenvolvem mais rapidamente (Teodoro *et al.*, 2014).

Antes da construção dos quebramares, para caudais da ordem dos 10 000 m³/s a restinga do Douro ficava completa ou parcialmente destruída, tornando a ganhar forma com o tempo. No entanto, foi recuando para o interior do estuário devido a fenómenos naturais, à extracção de inertes, dragagens e à escassez de fornecimento de sedimentos devido à construção das barragens, deixando a margem norte especialmente susceptível

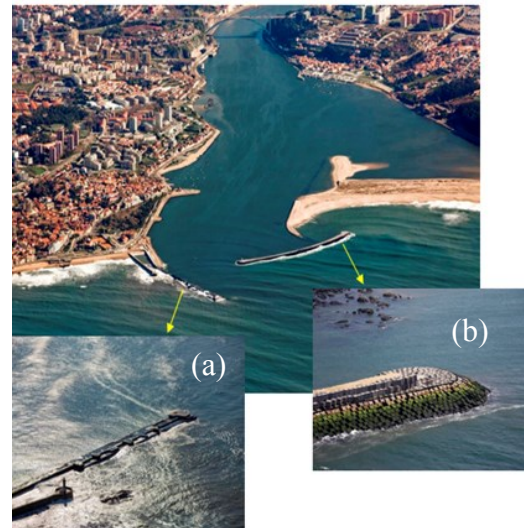


Fig. 2. Molhes do Douro: (a) molhe norte; (b) quebramar sul (destacado).

à agitação marítima. A solução encontrada para a estabilização da restinga do Douro consistiu na construção de dois novos molhes (cf. Figura 2) na embocadura, cujas obras terminaram em 2009.

Estes molhes, construídos com o objectivo de garantir a segurança do canal de navegação e evitar o seu assoreamento, alteraram a estrutura da restinga, produzindo um aumento da sua área e do seu volume (Bastos *et al.*, 2012).

Este facto, aliado ao facto de as margens do estuário do Douro se encontrarem fortemente urbanizadas, aumenta a importância da análise do efeito que uma restinga mais robusta terá sobre a hidrodinâmica do rio, em caso de cheias extremas.

3. Modelo

3.1. Modelo numérico

O modelo numérico escolhido foi o OpenTelemac. Este modelo é constituído por diferentes módulos que permitem simular a sedimentologia, a qualidade da água, a hidrodinâmica de escoamentos com superfície livre, escoamentos subterrâneos e propagação de ondas.

O OpenTelemac tem sido amplamente utilizado na simulação de escoamentos

fluviais e costeiros (e.g. Corti e Pennati, 2000, Horritt e Bates, 2002, Jones e Davies, 2010, Robins e Davies, 2010, Bredi et al, 2011, Monteiro et al., 2011). Para este estudo foi seleccionado o módulo Telemac 2D, o qual resolve as equações de Saint-Venant, permitindo modelar a hidrodinâmica de escoamentos com superfície livre a duas dimensões horizontais. No Telemac 2D, a velocidade vertical é considerada desprezável, o fundo e a superfície livre são considerados impermeáveis e a equação da continuidade é substituída por uma equação de onda, obtida conforme descrito em Lynch e Gray (1979).

3.2. Malha

O OpenTelemac utiliza o método dos elementos finitos sobre malhas triangulares não estruturadas, que permitem obter uma melhor resolução do domínio computacional, facilitando a descrição da hidrodinâmica e diminuindo o tempo de cálculo.

Para este trabalho foram utilizadas duas malhas: uma com a geometria anterior à construção dos molhes, e com a batimetria de 2002 em toda a extensão do estuário e zona costeira adjacente; e outra com a geometria posterior à construção dos molhes, com a batimetria de 2009 na zona do estuário inferior e a batimetria de 2002 no estuário médio e superior. Os dados de batimetria utilizados foram fornecidos pelo Instituto Hidrográfico da Marinha Portuguesa (IH).

Para a zona costeira foi utilizado o Modelo Batimétrico do Douro do IH, com uma resolução de 100×100 m². Para os pontos mais afastados da costa foram utilizados dados do GEBCO com uma resolução de $30'' \times 30''$ (Becker et al., 2009). Finalmente, foi utilizada informação extraída das cartas militares portuguesas à escala 1:25 000, para melhorar a transição entre a zona terrestre e a zona oceânica/fluvial.

A topografia da restinga foi inserida no modelo de forma a considerar o seu efeito na hidrodinâmica do estuário. Recorreu-se a um levantamento topográfico de 1998 para a malha pré-molhes, e a um levantamento de 2015 para a malha após a construção dos quebramares.

Para o cálculo da profundidade nos nós da malha, recorreu-se a um algoritmo de krigagem (Krige, 1951, Matheron, 1963). As malhas resultantes estão representadas na Figura 3.

Todos os níveis altimétricos estão referidos ao nível médio do mar.

3.3. Condições de fronteira e parâmetros numéricos e físicos do modelo

Foram definidas duas fronteiras sólidas e duas fronteiras líquidas. A primeira fronteira líquida é a fronteira oceânica em que o parâmetro prescrito foi a elevação da superfície livre ao longo do tempo. A segunda é a barragem de Crestuma em que o parâmetro prescrito foi o caudal. Os caudais utilizados na validação do modelo foram fornecidos pela Energias de Portugal (EDP). A elevação da superfície livre devida à maré foi extraída do modelo de marés TPXO.2 (Egbert et al., 1994). Nas fronteiras líquidas foram também prescritos como traçadores os valores da temperatura e da salinidade das massas de água. Para a fronteira oceânica considerou-se uma salinidade de 35,8 PSU, com base em informação obtida pelo satélite Aquarius e uma temperatura da água de 17 °C para o mês de Outubro (deCastro et al., 2008). Para a fronteira fluvial, onde a água ainda não está misturada, tomou-se uma salinidade de 0 PSU e uma temperatura de 8 °C (Pinto, 2007). Quanto às fronteiras sólidas, a primeira corresponde à linha de costa a sul do Douro e à margem esquerda do Douro até Crestuma e a segunda estende-se desde a barragem de Crestuma até à praia de Leça da Palmeira.

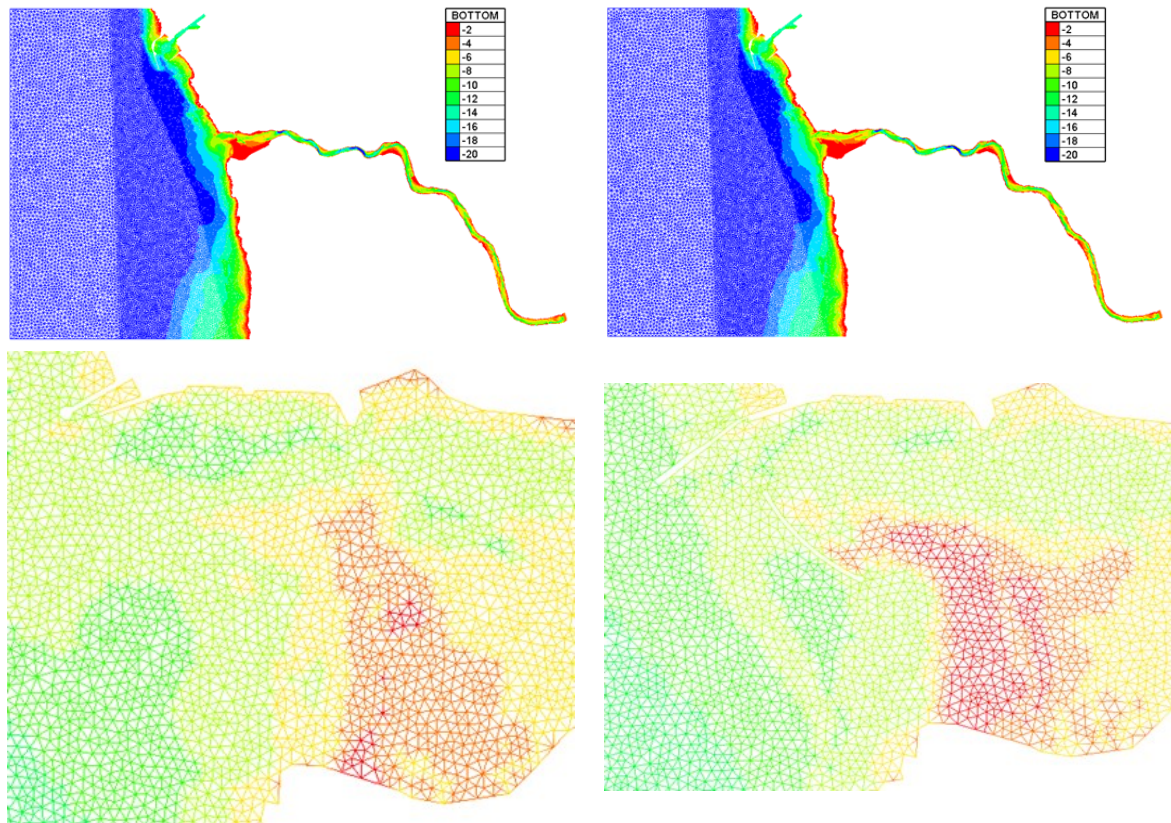


Fig. 3. Malhas e batimetria (em metros). Em cima, domínio computacional; em baixo, pormenor da restinga. À esquerda, antes da construção dos molhes; à direita, após a construção dos molhes.

Para o processo de cálculo, foi utilizado um passo de tempo de 6 s permitindo que o número de Courant se mantivesse sempre inferior a 1 em praticamente todos os pontos do domínio. A lei de atrito seleccionada foi a de Strickler, com um coeficiente de Strickler de $33 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$, sendo desprezado o atrito nas paredes laterais. Relativamente à turbulência horizontal optou-se por um coeficiente de viscosidade constante no tempo e no espaço, com o valor de $1 \text{ m}^2/\text{s}$. Também foi considerado o efeito de Coriolis para a latitude média local.

3.4. Calibração e validação do modelo

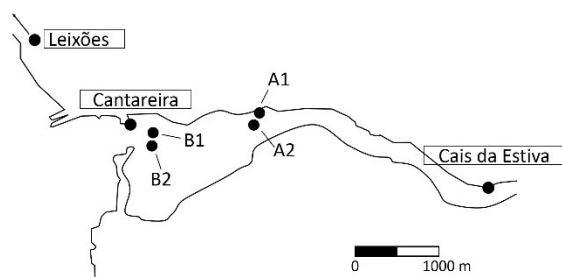


Fig. 4. Localização dos pontos de medição.

Os valores dos coeficientes anteriores foram obtidos após a calibração e validação do modelo. Para isto foram feitas várias simulações para o período temporal entre as 00:00 h do dia 18 de Setembro de 1994 e as 24:00 h do dia 19 de Setembro de 1994 e entre as 00:00 h do dia 25 de Setembro de 1994 e as 24:00 h do dia 4 de Outubro de 1994.

Os dados utilizados para a calibração e validação do modelo resultaram da Campanha Hidromorfológica para o Estudo da Barra do Douro efectuada a

Tabela 1. Coordenadas geográficas (Datum Lisboa) dos pontos de medição.

Local	Coordenadas	
	Latitude	Longitude
Leixões	41° 11' 03.0"	-08° 42' 06.5"
Cantareira	41° 08' 41.5"	-08° 39' 55.9"
Cais da Estiva	41° 08' 18.6"	-08° 36' 43.9"
A1	41° 08' 45.2"	-08° 38' 45.4"
A2	41° 08' 41.5"	-08° 38' 47.8"
B1	41° 08' 37.9"	-08° 39' 41.0"
B2	41° 08' 33.1"	-08° 39' 41.9"

pedido da Administração dos Portos do Douro e Leixões (APDL) entre Setembro e Outubro de 1994. Os pontos onde as medições foram realizadas encontram-se indicados na Figura 4 e na Tabela 1.

Os pontos assinalados como Leixões, Cantareira e Cais da Estiva correspondem aos marégrafos onde foram registadas as variações do nível da maré ao longo do tempo. Os pontos A1, A2, B1, B2 correspondem a correntómetros, onde foram registadas a intensidade e a direcção da corrente a três profundidades ao longo da coluna de água.

Como o Telemac 2D fornece uma média vertical do valor da velocidade, foi necessário estimar uma média vertical para as velocidades observadas. Para os pontos A1, A2, B1 e B2, a média vertical da velocidade da corrente, foi calculada como sendo

$$\bar{u} = \frac{u_s \frac{0.25 + d_m}{2} + u_m \frac{d_f - 0.5}{2} + u_f \left(\frac{d_f - d_m}{2} + 0.5 \right)}{d_f + 0.5} \quad (1)$$

onde u_s , u_m e u_f são as velocidades da corrente à superfície, a meia água e no fundo, d_m é a profundidade de medição da velocidade a meia água, e d_f é a profundidade de medição da velocidade no fundo. A comparação entre os resultados das simulações e as campanhas de amostragem está representada na Figura 5.

As primeiras 6 h de simulação funcionam como spin-up do modelo, devido às condições iniciais escolhidas (elevação da superfície livre e velocidade nulas) e à imposição de uma rampa inicial de 6 h nas condições fronteira de maré e de caudal fluvial. Após o spin-up, a elevação da superfície livre para Cais da Estiva, Leixões e Cantareira (Figuras 5a, 5b, e 5c, respectivamente) mostra uma boa concordância com as observações, tanto em fase como na amplitude da maré. Verifica-se no entanto uma pequena sobrelevação nas marés cheias

Tabela 2. Simulações para diferentes caudais em situação de preia-mar (PM) e baixa-mar (BM). SM: sem molhes; CM: com molhes.

Caudal fluvial (m ³ /s)	Período simulado	Situação	Nível de maré (m)
1000	24 h	SM	-1.86 (BM)
		SM	1.90 (PM)
		CM	-1.86 (BM)
		CM	1.90 (PM)
20 000	24 h	SM	-1.86 (BM)
		SM	1.90 (PM)
		CM	-1.86 (BM)
		CM	1.90 (PM)
23 000	24 h	SM	-1.86 (BM)
		SM	1.90 (PM)
		CM	-1.86 (BM)
		CM	1.90 (PM)
26 000	24 h	SM	-1.86 (BM)
		SM	1.90 (PM)
		CM	-1.86 (BM)
		CM	1.90 (PM)

simuladas no Cais da Estiva. Esta sobrelevação pode estar relacionada com diferenças entre a batimetria real do estuário nas datas de realização da campanha e as condições introduzidas na malha do modelo.

Os resultados para a velocidade da corrente (Figuras 5d, 5e e 5f) mostram também boa concordância para os pontos B1 e A1 com uma diferença máxima entre os valores modelados e medidos de cerca de 30 cm/s e 20 cm/s respectivamente. As diferenças observadas no ponto B2 podem estar relacionadas com diferenças entre a batimetria utilizada no modelo e a batimetria real à data da campanha devido à sua proximidade à restinga.

3.5. Simulação de cheias

Para estudar o efeito dos molhes e da restinga em situação de cheia excepcional, foi realizada uma série de 16 simulações, que se encontra resumida na Tabela 2. O período de retorno dos caudais de 20 000 m³/s e de 23 000 m³/s é de 218 e 585 anos, respectivamente. O caudal de 26 000 m³/s, caudal máximo descarregável na barragem de Crestuma, tem um período de retorno de 1572 anos, enquanto o caudal de 1000 m³/s é um

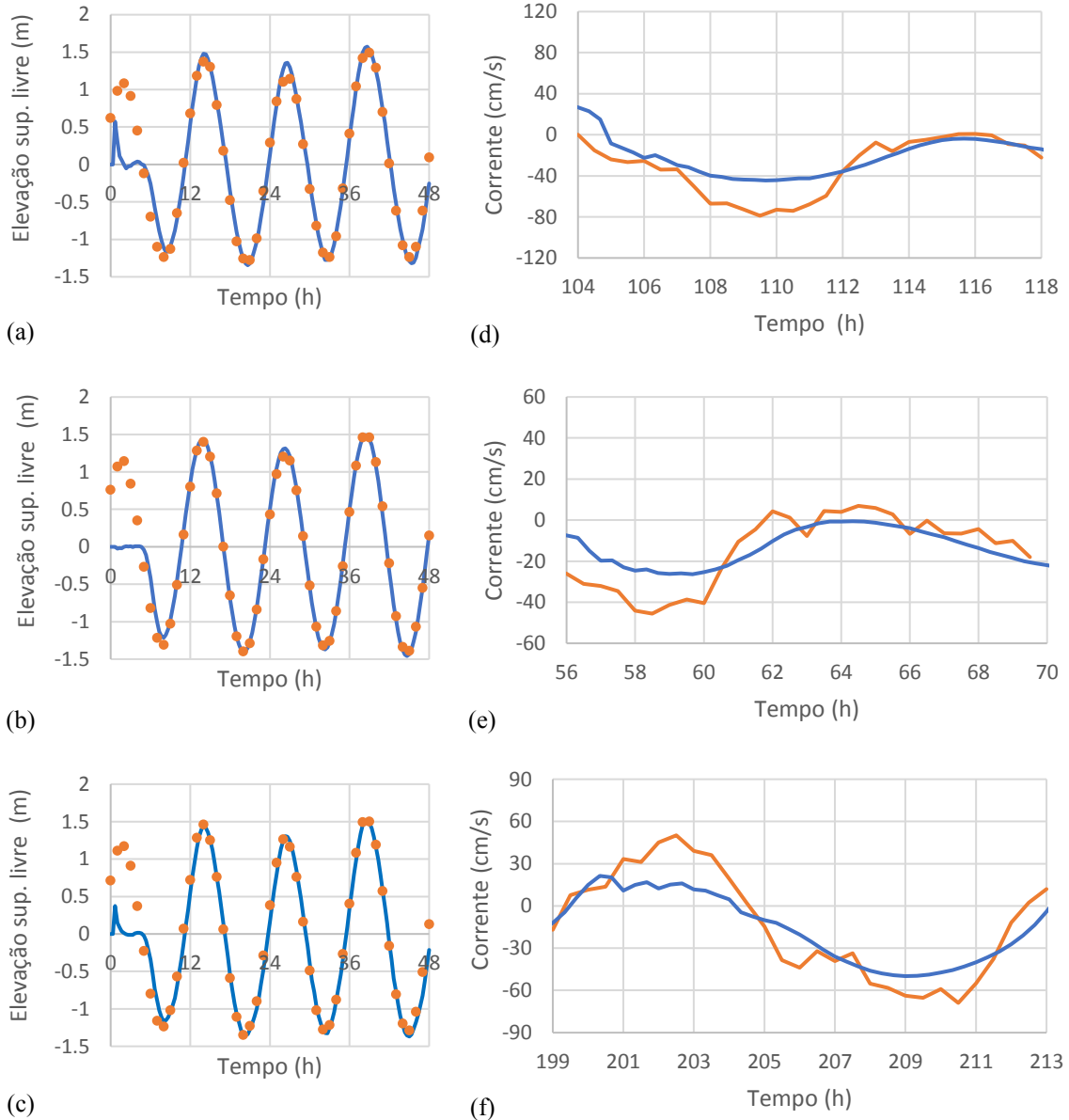


Fig. 5. Validação da elevação da superfície livre, 18–19 Set 1994, em (a) Cais da Estiva, (b) Leixões e (c) Cantareira. Validação da corrente, 25 Set–04 Out 1994, nos pontos (d) B1, (e) A1 e (f) B2. (—) campanha; (—) OpenTelemac.

caudal de Inverno bastante frequente, com um período de retorno de cerca de 1 ano. Estes períodos de retorno foram calculados aplicando a distribuição de extremos de Gumbel aos caudais de ponta de cheia, e aos respectivos períodos de retorno associados, extraídos do Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Douro (APA, 2012).

Os níveis de maré considerados correspondem às previsões para a preamar máxima e para a baixa-mar mínima em Leixões no ano de 2016 (IH, 2016). As simulações foram realizadas para as

duas configurações de malhas implementadas: antes e pós-molhes. Todas as simulações corresponderam a períodos de 24 h, sendo 3 h de spin-up a partir do repouso, seguidas de 21 h de simulação com caudal e nível de maré constantes.

4. Análise de resultados

Os perfis longitudinais da elevação da superfície livre no último instante de simulação para cada um dos caudais considerados, antes e após a construção

dos molhes e em situação de preia-mar e baixa-mar encontram-se representados nas Figuras 6 a 9. São apresentados apenas os primeiros 5 km a montante da embocadura, por ser a zona que normalmente é inundada em situação de cheia.

4.1. Caudal de 1000 m³/s

Para o caudal de 1000 m³/s, a diferença de nível entre a preia-mar e a baixa-mar no interior do estuário é da ordem dos 4 m para as duas situações: pré e pós-molhes (cf. Figura 6). Portanto, para caudais desta ordem de grandeza e para ambos os casos, a influência da maré faz-se sentir em praticamente toda a extensão do estuário inferior. Observa-se também que os níveis absolutos de água dentro do estuário são semelhantes para as duas configurações. Pode-se concluir que neste caso o efeito da construção dos molhes não condiciona a capacidade da

barra para garantir o escoamento do caudal fluvial. Por outro lado, os valores da profundidade da água sobre a restinga (cf. Figura 10) mostram que neste caso não se verificaria galgamento.

4.2. Caudal de 20 000 m³/s

Para um caudal de cheia de 20 000 m³/s e no cenário pré-molhes, não há qualquer diferença entre os níveis de água no estuário para a preia-mar e para a baixa-mar, o que indica que a influência da maré não se faz sentir (cf. Figura 7). No entanto, para a configuração pós-molhes, verifica-se uma ligeira diferença, inferior a 0.5 m, entre a preia-mar e a baixa-mar. O nível de água no interior do estuário no caso pós-molhes é superior em cerca de 1.5–2.0 m ao registado na situação pré-molhes, o que está relacionado com o facto de a restinga pós-molhes não ser galgada, dado o aumento da sua robustez (cf. Figura 11).

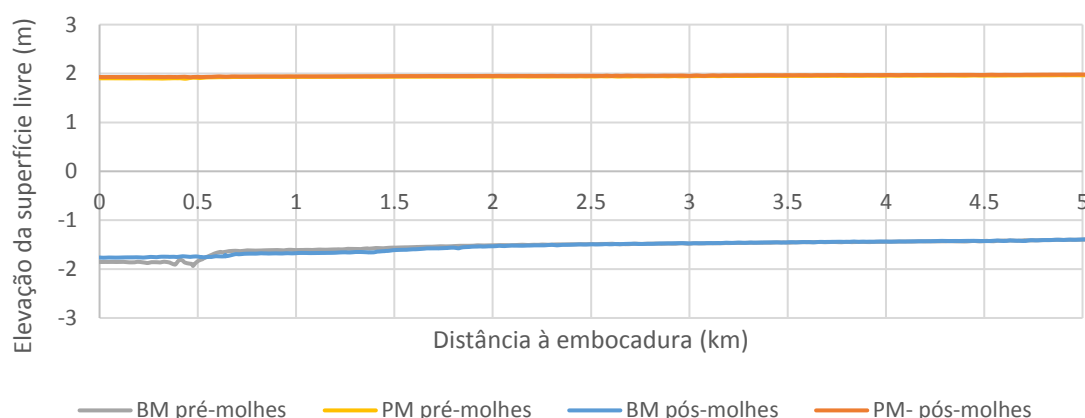


Fig. 6. Perfis longitudinais da elevação da superfície livre para um caudal de 1000 m³/s.

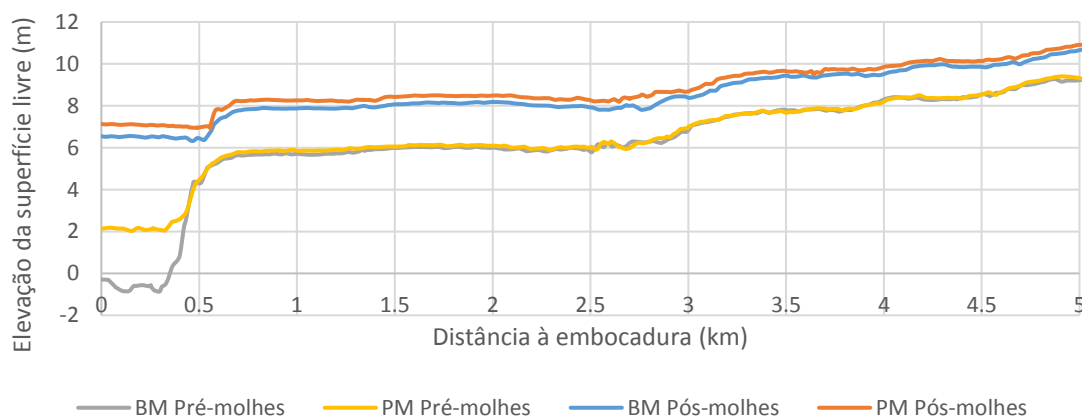


Fig. 7. Perfis longitudinais da elevação da superfície livre para um caudal de 20 000 m³/s.

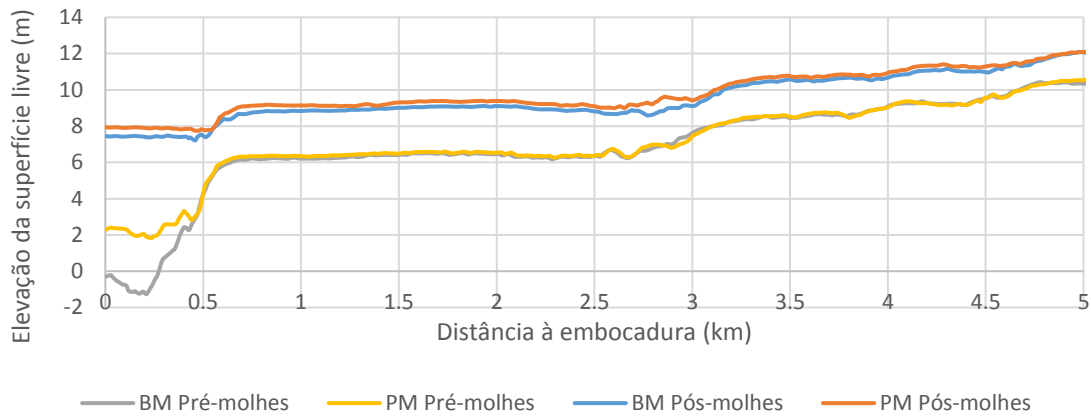


Fig. 8. Perfis longitudinais da elevação da superfície livre para um caudal de 23 000 m³/s.

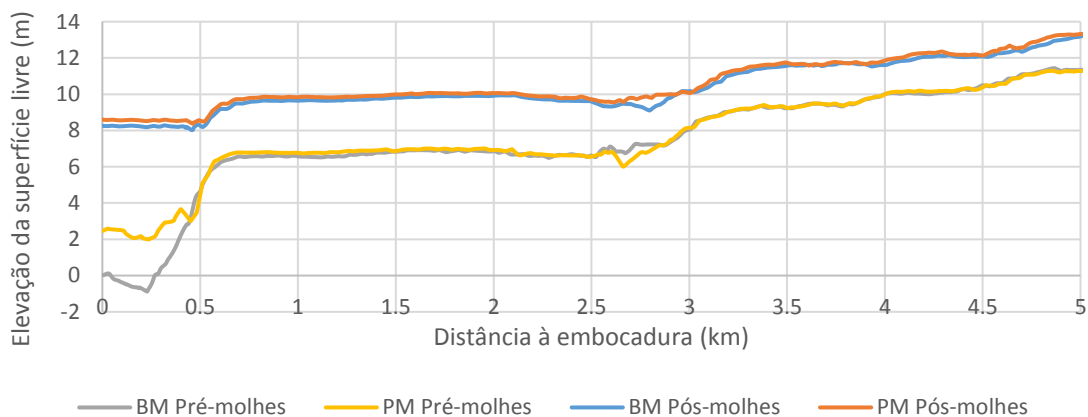


Fig. 9. Perfis longitudinais da elevação da superfície livre para um caudal de 26 000 m³/s.

Na Figura 7 e para a configuração pré-molhes, é também visível a passagem do escoamento fluvial a escoamento costeiro a cerca de 300–400 m da embocadura. Na configuração pós-molhes, esse ponto de passagem foi transferido bastante mais para jusante, próximo do cabeço do molhe norte, o que é visível na Figura 12, o que permite concluir que a construção dos molhes canalizou o escoamento fluvial para o exterior da barra.

4.3. Caudal de 23 000 m³/s

Para o caudal de 23 000 m³/s, verifica-se que o nível de água no interior do estuário no caso pós-molhes é superior em cerca de 1.5–2.5 m ao registado na situação pré-molhes (cf. Figura 8). Após a construção dos molhes, a restinga encontra-se fortalecida e não é galgável, como se pode verificar da análise da Figura 13. Tal como para o caso do

caudal de 20 000 m³/s, também aqui a influência da maré se faz sentir na configuração pós-molhes, mas limitada a cerca de 0.5 m de amplitude. Também para este caudal, o escoamento fluvial é canalizado para jusante na configuração pós-molhes.

4.4. Caudal de 26 000 m³/s

Para este caudal, com um período de retorno superior a 1500 anos, a influência da maré é inexistente para qualquer das configurações geométricas analisadas (cf. Figura 9). O nível de água no interior do estuário na configuração pós-molhes é entre 2 m e 3 m superior ao registado na configuração pré-molhes. Na Figura 14 está representada a profundidade do escoamento na zona da restinga. Verifica-se que para ambas as configurações a restinga é galgada, mas com maior dificuldade na configuração pós-molhe, o que contribui para o

aumento do nível da água registado no estuário. Também para este caudal, o escoamento fluvial é canalizado para jusante na configuração pós-molhes.

4.5. Consequências

Na Tabela 3 listam-se alguns dos pontos notáveis das margens do estuário que se sabe serem mais susceptíveis a inundações aquando da ocorrência de cheia. Todos estes locais ficaram submersos em todas as simulações (pré e pós-molhes), excepto na simulação com

o caudal de 1000 m³/s, em que nenhum dos locais ficou submerso.

5. Conclusões

O modelo teve em geral um bom comportamento no processo de calibração e validação. Verificaram-se no entanto algumas discrepâncias que poderão estar relacionadas com incoerências entre a batimetria utilizada no modelo e a batimetria real existente na altura da campanha, bem como com o

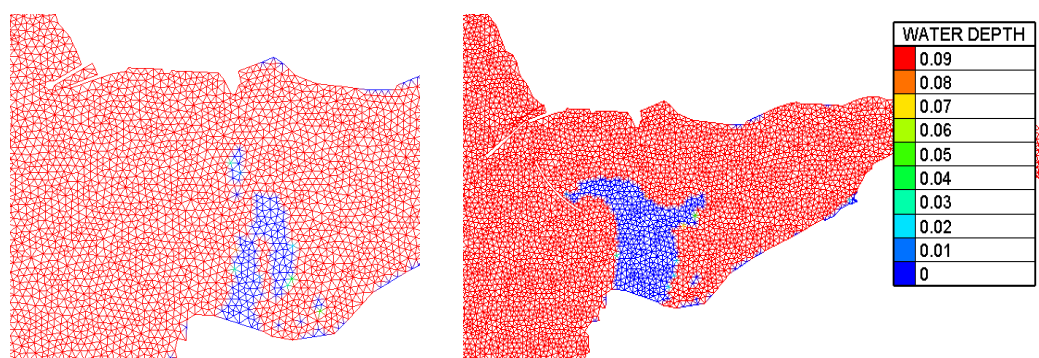


Fig. 10. Profundidade da água na zona da restinga, na preia-mar, para um caudal de 1000 m³/s. À esquerda, antes da construção dos molhes. À direita, após a construção dos molhes.

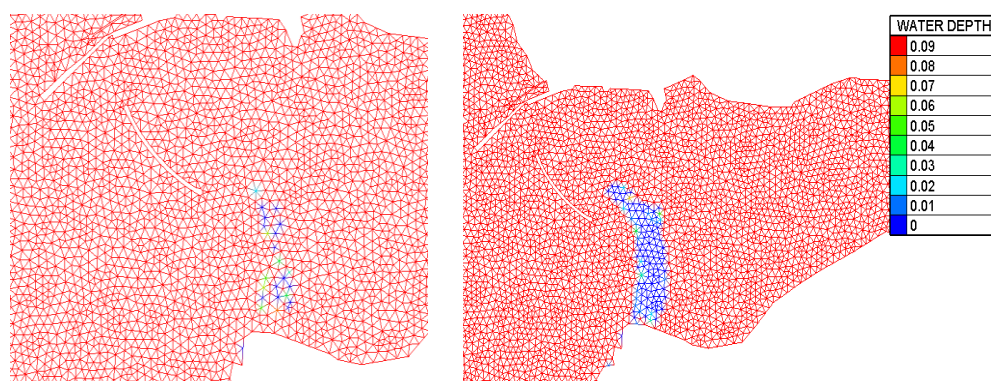


Fig. 11. Profundidade da água na zona da restinga, na preia-mar, para um caudal de 20 000 m³/s. À esquerda, antes da construção dos molhes. À direita, após a construção dos molhes.

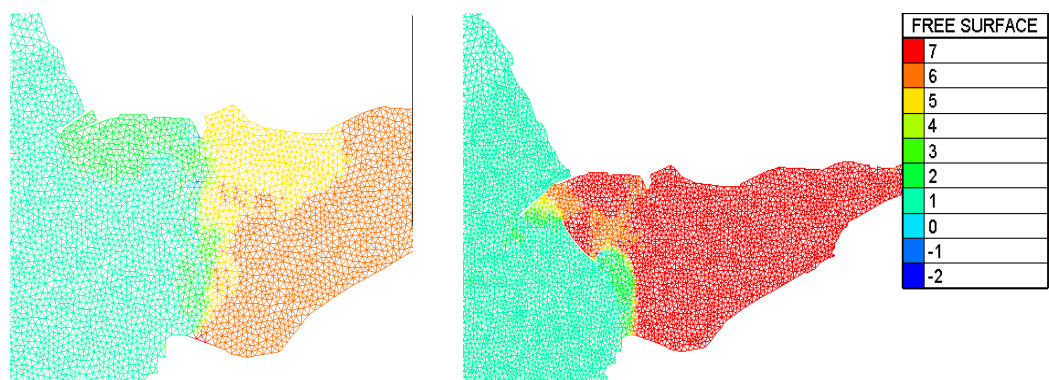


Fig. 12. Elevação da superfície livre para uma cheia extrema de 20 000 m³/s na preia-mar. À esquerda, antes da construção dos molhes. À direita, após a construção dos molhes.

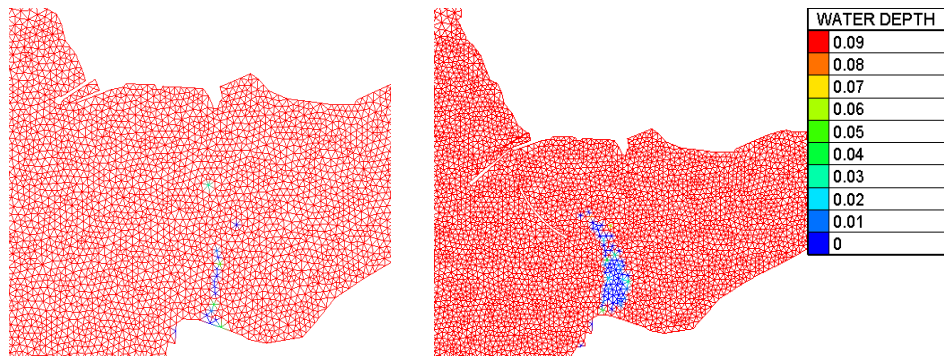


Fig. 13. Profundidade da água na zona da restinga, na preia-mar, para um caudal de 23 000 m³/s. À esquerda, antes da construção dos molhes. À direita, após a construção dos molhes.

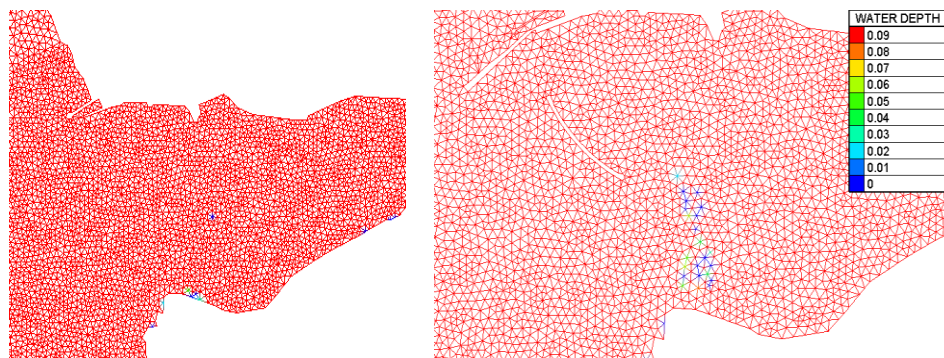


Fig. 14. Profundidade da água na zona da restinga, na preia-mar, para um caudal de 26 000 m³/s. À esquerda, antes da construção dos molhes. À direita, após a construção dos molhes.

procedimento de cálculo da média vertical das velocidades observadas.

Em todas as simulações, com excepção da simulação com caudal de 26 000 m³/s, verificou-se que a restinga pós-molhes não é galgada, o que sugere que a construção dos molhes conduziu de facto ao seu fortalecimento. Isto é vantajoso ao nível da protecção das margens face à agitação marítima, mas em situação de cheia torna-se uma desvantagem, ao constituir um obstáculo ao escoamento do caudal cheia. O eventual rompimento da restinga, com um comportamento tipo fusível, está também posto em causa dado o aumento das suas dimensões em área e em volume.

Para a simulação com um caudal de 1000 m³/s, nenhum dos locais notáveis sofreu inundações, sendo este um caudal com uma frequência de ocorrência elevada nos meses de Inverno. Para as simulações de cheias com caudais mais

elevados verificou-se que todos os locais estudados ficaram inundados.

Foi notório que, para os diferentes locais, a elevação da superfície livre, para a mesma cheia, aumenta após a construção dos molhes relativamente à fase anterior à sua construção. Isto corrobora a afirmação de que a restinga está a ficar cada vez mais forte e que quando ocorrem cheias com grandes caudais, que a barragem não tem capacidade de

Tabela 3. Locais notáveis mais susceptíveis à acção das cheias.

Local	Distância à embocadura (km)	Altitude (m)	Concelho
Cantareira	1.3	3	Porto
S. Pedro da Afurada	2.5	3	V. Nova de Gaia
Massarelos	3.5	3	Porto
Alfândega	4.5	8	Porto
Cais de Gaia	5.0	4	V. Nova de Gaia

laminar, podem esperar-se consequências mais graves em todos os pontos de referência utilizados.

A construção dos molhes permitiu à restinga fixar a sua posição. Antes da construção, a restinga registava uma migração para o interior do estuário, deixando as margens completamente desprotegidas face à agitação marítima. O facto da sua posição se encontrar agora fixa não quer dizer que ela não apresente um dinamismo elevado, variando a sua área e volume de acordo com a agitação marítima, regime de caudais e energia do vento. O aumento da sua espessura após a construção dos molhes atingiu um valor tão elevado que pode dificultar a sua destruição durante episódios de cheias fortes, aumentando a elevação do nível de água na zona estuarina e conduzindo a efeitos mais graves nas margens.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito da linha de investigação ECOSERVICES integrada no Projecto Estruturado de I&D&I INNOVMAR - Innovation and Sustainability in the Management and Exploitation of Marine Resources (referência NORTE-01-0145-FEDER-000035), co-financiado pelo Programa Operacional Regional do Norte (NORTE 2020), através do Portugal 2020 e do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER).

Referências

APA (2012), Plano de Gestão da Região Hidrográfica do Douro RH3. Relatório de Base. Parte 2 — Caracterização e diagnóstico da região hidrográfica. Agência Portuguesa do Ambiente.

Azevedo, I.C., P.M Duarte, A.A. Bordalo, (2008), Understanding spatial and temporal dynamics of key environmental characteristics in a mesotidal Atlantic estuary (Douro, NW Portugal).

Estuarine, Coastal and Shelf Science 76:620–633.

Bastos, L., A. Bio, J.L.S. Pinho, H. Granja and A.J. da Silva (2012), Dynamics of the Douro estuary sand spit before and after breakwater construction. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 109:53–69.

Becker, J.J., D.T. Sandwell, W.H.F. Smith, J. Braud, B. Binder, J. Depner, D. Fabre, J. Factor, S. Ingalls, S.-H. Kim, R. Ladner, K. Marks, S. Nelson, A. Pharaoh, R. Trimmer, J. Von Rosenberg, G. Wallace and P. Weatherall (2009), Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: SRTM30 PLUS. *Marine Geodesy* 32:355–371.

Bedri, Z., M. Bruen, A. Dowley and B. Masterson (2011), A three-dimensional hydro-environmental model of Dublin bay. *Environmental Modeling and Assessment* 16:369–384.

Corti, S. and V. Pennati (2000), A 3-D hydrodynamic model of river flow in a delta region. *Hydrological Processes* 14:2301–2309.

da Silva, M.C. (2000), Estuários — Critérios para uma classificação ambiental. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 5:25–35.

deCastro, M., M. Gómez-Gesteira, M.N. Lorenzo, I. Álvarez and A.J.C. Crespo (2008), Influence of atmospheric modes on coastal upwelling along the western coast of the Iberian Peninsula, 1985 to 2005. *Climate Research* 36:169–179.

Dias, A.A.P. (sem data), O Estuário do Rio Douro — O risco de cheias. Trabalho de Licenciatura, FLUP.

Dionne, J.C. (1963), Towards a more adequate definition of the St. Lawrence estuary. *Zeits für Geomorphologie* 7:36–44.

Egbert, G.D., A.F. Bennett and M.G.G. Foreman (1994), Topex/Poseidon tides estimated using a global inverse model. *Journal Geophysical Research* 99: 24821–52.

Granja, H.M., L. Bastos, J.L.S. Pinho, J. Gonçalves, R.F. Henriques, A. Bio, J. Mendes and A. Magalhães (2011), Integração de metodologias no estabelecimento de um programa de monitorização costeira para avaliação de risco. VII Conferência Nacional de

- Cartografia e Geodesia, 5 e 6 de Maio de 2011, Porto, FCUP, pp. 11.
- Horritt, M.S. and P.D. Bates (2002), Evaluation of 1D and 2D numerical models for predicting river flood inundation. *Journal of Hydrology* 268:87–99.
- IH (2016), Tabelas e Maré 2016, Vol. I, Capítulo III, Informação Suplementar sobre Marés. Instituto Hidrográfico.
- Jones, J.E. and A.M. Davies (2010), Application of a finite element model to the computation of tides in the Mersey Estuary and Eastern Irish Sea. *Continental Shelf Research* 30:491–514.
- Krige, D.G. (1951), A Statistical Approach to Some Mine Valuations and Allied Problems at the Witwatersrand, Master's thesis, University of Witwatersrand.
- Lynch, D.R. and W.R. Gray (1979), A wave equation model for finite element tidal computation. *Computers and Fluids* 7:207–228.
- Magalhães, C.M., A.A. Bordalo and W.J. Wiebe (2002), Temporal and spatial patterns of intertidal sediment-water nutrient and oxygen fluxes in the Douro River estuary, Portugal. *Marine Ecology Progress Series* 233:55–71.
- Matheron, G. (1963), Principles of geostatistics. *Economic Geology* 58:1246–1266.
- Monteiro, I.O., W.C. Marques, E.H. Fernandes, R.C. Gonçalves and O.O. Möller (2011), On the effect of earth rotation, river discharge, tidal oscillations, and wind in the dynamics of the Patos Lagoon coastal plume. *Journal of Coastal Research* 27:120–130.
- Pinto, J.A.G.T. (2007), Influência do Regime de Escoamento Fluvial na Hidrologia e Dinâmica do Estuário do Douro. Relatório Final de Estágio. Universidade de Évora.
- Portela, L.I. (2008), Sediment transport and morphodynamics of the Douro River estuary. *Geo-Marine Letters* 28:77–86.
- Robins, P.E. and A.G. Davies (2010), Morphological controls in sandy estuaries: the influence of tidal flats and bathymetry on sediment transport. *Ocean Dynamics* 60:503–517.
- Santos, I, A.C. Teodoro and F. Taveira-Pinto (2010), Análise da evolução morfológica da restinga do rio Douro. 5^{as} Jornadas de Hidráulica, Recursos Hídricos e Ambiente, 25 de Outubro de 2010, Porto, FEUP, pp. 14.
- Shewchuk, J.R. (1996), Triangle: Engineering a 2D quality mesh generator and Delaunay triangulator. In: Lin MC, Manocha, D. (Eds.), *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering. Lecture Notes in Computer Science* 1148:203–222.
- Teodoro, A.C., F. Taveira-Pinto and I. Santos (2014), Morphological and statistical analysis of the impact of breakwaters under construction on a sand spit area (Douro River estuary). *Journal of Coastal Conservation* 18:177–191.
- Vieira, M.E.C. and A.A. Bordalo (2000), The Douro estuary (Portugal): a mesotidal salt wedge. *Oceanologica Acta* 23:585–594.